

بررسی عددی انتقال حرارت نانو سیال در مجتمع سوخت راکتور VVER-1000

امید صفرزاده^{۱*}، امیر سعید شیرانی^۱، محمد ره گشای^۲

^۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

چکیده: در این مقاله، انتقال حرارت نانو سیال با غلظت‌های مختلف در حال عبور از مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 مورد بررسی قرار گرفته است. نانو سیال به عنوان مخلوط نانو ذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و آب به عنوان سیال پایه شناخته می‌شود. ویسکوزیته نانو سیال بر مبنای داده های آزمایشگاهی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان غلظت حجمی نانو ذرات، میزان نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: نانو سیال، مدل دوفاز، RELAP5، انتقال حرارت

۱- مقدمه

فرایند خنک سازی در نیروگاه‌های هسته‌ای اهمیت بالایی است. امروزه اغلب راکتورها از مقادیر قابل توجه آب به عنوان یک عامل خنک ساز در مواقعی که قلب راکتور هسته‌ای بیش از حد گرم شده استفاده می‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهد با استفاده از نانو سیال می‌توان تا ۱۰٪ افزایش برداشت گرما از قلب راکتور را بدست آورد. نانو سیال در واقع مخلوط معلق و پراکنده ذرات در اندازه نانو در سیال پایه است.

خواص حرارتی عموم سیالات استفاده شده به عنوان خنک کننده، ضریب رسانایی حرارتی پایین تری در مقایسه با فلزات جامد دارند. تلاش‌های زیادی برای افزایش ضریب انتقال حرارت توسط ایجاد آشفتگی، افزایش سطح یا اضافه کردن ذرات معلق جامد صورت پذیرفته است که اگر ضریب رسانایی حرارتی خود سیال پایین باشد یک بهبود جزئی حاصل می‌شود. بنابراین افزایش ضریب رسانایی حرارتی سیال خنک کننده مورد بررسی قرار گرفته است. تلاش‌های که اخیراً برای افزایش ضریب رسانایی حرارتی سیال صورت پذیرفته شامل اضافه کردن نانو ذرات جامد به سیال پایه است که منجر به افزایشی در حدود ۲ تا ۳ برابر ضریب رسانایی حرارتی سیال پایه می‌شود. با توجه به اینکه ذرات اضافه شده در اندازه نانومتر است مشکلاتی در زمینه ته نشینی، بسته شدن مجراها، افت فشار و فرسایش کانال ایجاد نمی‌شود. وجود این نانو

ذرات باعث تغییر خواص حرارتی سیال از جمله ضریب رسانایی حرارتی، ویسکوزیته و ظرفیت حرارتی می شود. مرجع [۱] انتقال حرارت جابجایی و مشخصات سیال را در دو حالت جریان درهم و آرام به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان دهنده افزایش خوب انتقال حرارت است و ضریب اصطکاک تغییر چندانی نسبت به سیال پایه نشان نداده است. مرجع [۲] اثرات تغییر عدد رینولز و غلظت حجمی نانو ذرات را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان دهنده بهبود انتقال حرارت با افزایش عدد رینولز و افزایش غلظت حجمی نانو ذرات است. مایگا و همکاران انتقال حرارت نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم را برای سیال درهم را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [۳]. مرجع [۴]، به صورت تجربی انتقال حرارت، افت فشار و ویسکوزیته نانوسیال دی اکسید تیتانیوم با حداکثر ۰.۳٪ غلظت حجمی نانو ذرات را بررسی کرده و یک رابطه جدید برای انتقال حرارت جابجایی برای غلظت های مختلف سیال پیشنهاد نمودند. در مرجع [۵] انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال اکسید مس/آب و اکسید آلومینیوم/آب به صورت تجربی انجام دادند و نتیجه گرفتند که بهبود انتقال حرارت ناشی از چندین فاکتور ضریب رسانایی حرارتی، نوع و اندازه نانو ذره، سیال پایه، رژیم سیال است.

در این تحقیق، نانو سیال شامل Al_2O_3 و آب در مجتمع سوخت راکتور VVER-1000 به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی اثرات نانو سیال مدل هموژن دوفازی پیاده سازی شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل فوق با کد RELAP5 صورت پذیرفته که نشان دهنده دقت قابل قبول مدل استفاده شده می باشد.

۲- مدل سازی ریاضی

۲-۱- خواص حرارتی نانوسیال

از روابط زیر برای محاسبه خواص حرارتی و فیزیکی نانو سیال Al_2O_3 استفاده می شود (زیر نویس ϕ ، bf و nf به ترتیب نشان دهنده ذرات، سیال پایه و نانو سیال است)

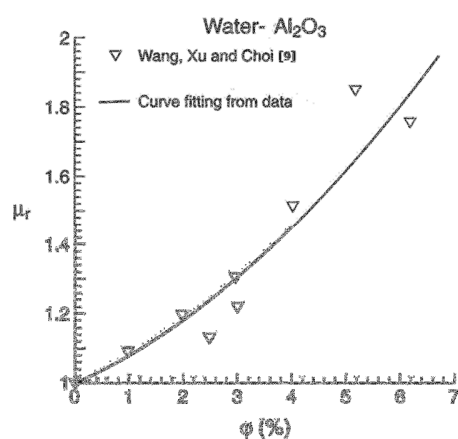
$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (1)$$

$$(c_p)_{nf} = (1 - \phi)(c_p)_{bf} + \phi(c_p)_p \quad (2)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 123\phi^2 + 7.3\phi + 1 \quad (3)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad (4)$$

معادلات (۱) و (۲) یک معادله کلی برای محاسبه دانسیته و ظرفیت گرمایی است. معادلات (۳) و (۴) برای محاسبه دینامیک ویسکوزیته نانو سیال استفاده می شود که از داده های تجربی و با استفاده از برازش منحنی بدست آمده است [۶-۸]. شکل ۱ منحنی برازش شده از داده های آزمایشگاهی را برای ویسکوزیته نشان می دهد.



شکل ۱. داده های تجربی و رابطه دینامیک ویسکوزیته [۳]

معادله (۴) با استفاده از مدل شناخته شده که توسط همیلتون و کراس پیشنهاد شد بدست آمده است [۸]. چنین مدلی برای مخلوط ذرات در اندازه های میلی متر و میکرو متر است و برای ذرات در حدود نانومتر جواب های قابل قبولی دارد.

۲-۲- معادلات حاکم

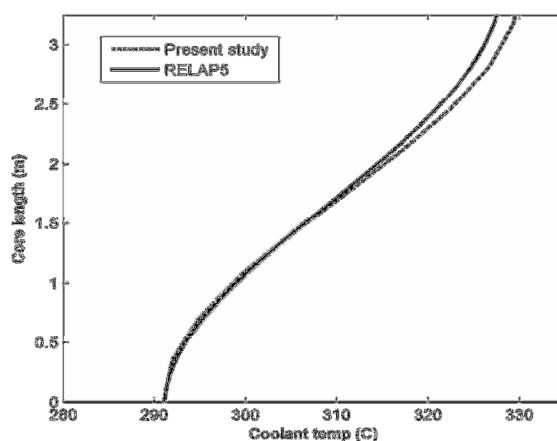
در این تحقیق مسئله جابجایی اجباری نانو سیال که ترکیب آب و نانوذرات Al_2O_3 را در مجتمع سوخت گرم راکتور VVER-1000 مورد بررسی قرار داده شده است. باتوجه به اندازه کوچک ذرات می توان فرض نمود که مخلوط به صورت معلق است و بنابراین حرکت لغزشی بین فازها وجود ندارد. همچنین با لحاظ تعادل حرارتی، مخلوط مایع و جامد می تواند به صورت سیال تک فاز با در نظر گرفتن خواص بدست آمده شده لحاظ شود. سیال به صورت پایدار، درهم و متقارن در نظر گرفته شده است. تحت شرایط فوق معادلات حاکم به صورت زیر بیان می گردد.

$$\frac{\partial}{\partial z}(G_m) = 0 \quad (4)$$

$$G_m \frac{\partial v_m}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{fG_m |G_m|}{2\rho_m^2 D_e} - \rho_m g \quad (5)$$

$$G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \dot{q}'' \frac{P_h}{A_z} + \frac{G_m}{\rho_m} \left(\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{fG_m |G_m|}{2\rho_m^2 D_e} \right) \quad (6)$$

بر روی دیواره شار حرارتی به صورت غیر یکنواخت وجود دارد. معادلات فوق با استفاده از روش عددی بر مبنای حجم کنترل محدود^۱ حل گردیده اند [۱۱-۱۲]. این روش بر مبنای انتگرال گیری بر روی معادلات بقا در حجم کنترل محدود است. سرعت در مرکز مرزهای حجم محاسبه می شود و فشار و دیگر پارامترهای اسکالر از قبیل دما در مرکز حجم کنترل محاسبه می گردد. معادلات گسسته جبری حاصل از فرایند انتگرالی به صورت متوالی و تکراری در طول کانال حل می گردد.



شکل ۲. مقایسه دمای خنک کننده

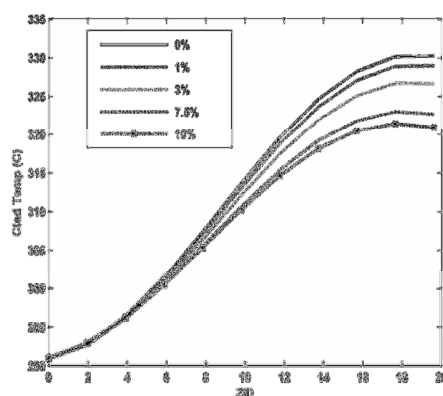
۳- نتایج و بحث

مجتمع سوخت به صورت یک کانال با قطر هیدرولیکی معادل ۰.۱۸ متر، طول کانال ۳.۵۳ متر مدل شده است. نرخ حرارتی خطی این مجتمع سوخت با استفاده از توان متوسط و پیک توان شعاعی برای مجتمع سوخت گرم بدست آمده است که در حدود $\dot{q}'' = 1.016e7$ است. سرعت ورودی کانال $v_0 = 5.6$ متر است. نتایج مدل فوق با استفاده از کد

¹ Finite control volume

RELAP5 مقایسه شده است. شکل ۲ دمای خنک کننده بدست آمده از مدل فوق و RELAP5 را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود تطابق خوبی بین مدل و کد RELAP5 وجود دارد.

همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبول به نظر می‌رسد به استثناء ناحیه نزدیک به قسمت خروجی کانال که مقداری تفاوت وجود دارد. چنین تفاوتی بیشتر به دلیل اندازه شبکه در این ناحیه خاص است. از این مدل برای انجام شبیه سازی عددی مورد بحث با استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم/آب استفاده شده است.



شکل ۳. اثر ذرات با غلظت‌های مختلف بر دمای غلاف سوخت

نتایج به صورت نحوی واضح اثر اضافه نمودن نانوذرات را در بهبود رفتار حرارتی نشان می‌دهد. شکل ۳ تاثیر غلظت‌های حجمی مختلف را بر توزیع دمایی غلاف سوخت نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است با اضافه کردن نانو ذرات دما شروع به کاهش می‌نماید. در بخش انتهایی کانال کاهش نزدیک به ۱۰ درجه سانتیگراد در دمای غلاف سوخت نسبت به $\phi=0\%$ و $\phi=10\%$ مشاهده می‌شود. این نتایج مزیت استفاده از نانوذرات را نشان می‌دهد که منجر به بهبود خواص حرارتی سیال می‌گردد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار حرارتی و هیدرولیکی نانو سیال در مجتمع سوخت گرم راکتور به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده بهبود و افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت با اضافه نمودن نانو سیال است. بهبود در انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی ذرات زیاد می‌شود.

اصطلاحات

G_m	شار جرمی ($kg / m^2 s$)	\dot{q}''	شار حرارتی دیواره (w / m^2)
v_m	سرعت (m)	P_h	محیط گرما دیده (m)
P	فشار (Mpa)	A_z	سطح مقطع کانال (m^2)
f	ضریب اصطحاک	c_p	ظرفیت گرمایی (kJ / kgK)
ρ	چگالی (kg / m^3)	μ	ویسکوزیته ($Pa s$)
D_e	قطر هیدرولیک	k	رسانایی حرارتی (w / mK)
g	شتاب ثقل زمین m / s^2	ϕ	غلظت حجمی نانوسیال
h_m	آنتالپی (kJ / kg)	μ_r	ویسکوزیته نسبی

مراجع

- [1] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, ASME Journal of Heat Transfer 125 (2003) 151–155.
- [2] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 5181–5188.
- [3] S.E.B. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube, Super Lattices and Microstructures 35 (3–6) (2004) 543–557.
- [4] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer 11 (1998) 151–170.
- [5] S.Z. Heris, M.N. Esfahany, G. Etemad, Investigation of CuO/water nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, Journal of Enhanced Heat Transfer 13 (2006) 279–289.
- [6] Masuda, H., A. Ebata, K. Teramae and N. Hishinuma, , Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of -Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles), *Netsu Bussei(Japan)* 4, (1993), 227-233.
- [7] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, J. Heat Transfer 121 (1999) 280–289.
- [8] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, I & EC Fundament. 1 (1962) 182
- [9] X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture, J. Thermophys. Heat Transfer 13 (4) (1999) 474–480.
- [10] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Pub. Co, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.
- [11] Fluent 6 User's Guide, Fluent Inc., NH, USA, 2002.